

2025年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告表單

題目名稱：「看磷老鉬」-傳統磷鉬藍方法之改良應用於定量水中ppm級磷酸鹽

一、摘要

隨著都市化與清潔用品廣泛使用，家庭排放的含磷廢水成為水體優養化的主要來源，導致藻類大量繁殖、水質惡化及生態失衡。為改善傳統磷鉬藍法在檢測低濃度磷酸鹽時的操作繁瑣與試劑使用過多等問題，本研究針對試劑濃度與操作條件進行系統性優化，提出一套低成本、高靈敏度且環境友善的改良分析方法。

傳統磷鉬藍法為提升靈敏度，常加入銻(Sb^{3+})作為促進劑，以加快磷鉬酸形成與還原速率。然而，銻本身屬重金屬污染物，具潛在毒性與環境污染疑慮，且價格相對高昂，不利於大規模或教育性使用。因此，本研究特意避用銻，改採調控鉬酸銨與還原劑（維生素 C）濃度的方式，尋求不依賴銻而仍具檢測效能的反應條件，以降低成本與生態風險。

本研究以九宮格實驗法為核心設計，分別調控鉬酸銨($10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ M}$)與還原劑維他命 C 的濃度，篩選出反應最顯著的組合，建立檢量線並以分光光度法進行比色分析。吸收波長經實測後選定為 810 nm，並確認在低濃度範圍內具有良好線性($R^2 > 0.99$)，高濃度則採用二次函數進行擬合，展現高度精確性。

應用實驗部分，我們成功監測新竹地區四個行政區一週內自來水總磷濃度，結果介於 0.045 至 0.101 ppm，反映出本方法具備良好的靈敏度與重現性。進一步嘗試將方法應用於洗髮精品質分析時，發現因界面活性劑導致樣品混濁，干擾吸光值判讀，顯示需配合前處理技術以去除干擾物質。

本研究不僅提供環境監測的實用工具，也強化大眾對於日常用水中磷含量變異的認知，具有學術、教育與社會應用價值。

二、探究題目與動機

近年來，水體優養化問題日益嚴重，造成藻類暴增、水中溶氧量下降，進而導致水質惡化與生態失衡。家庭排放的含磷廢水被認為是主要污染來源之一，尤其來自清潔用品中的磷化合物，易隨生活污水進入水體，成為環境負擔。現行檢測水中磷含量多以磷鉬藍法為主，但傳統方法需大量化學試劑，操作成本與環境風險較高。

本研究旨在改良磷鉬藍法，以降低試劑使用量，同時提升其在低濃度下的靈敏度與定量準確性。我們運用九宮格法篩選最佳試劑濃度組合，並建立自製檢量線，期望發展出一套兼具環保、經濟與穩定性的水質監測方法。未來可應用於日常生活中自來水水質監測，提升民眾對水體污染與生活用水品質的關注。

三、探究目的與假設

目的：

1. 找出磷鉬藍與鉬藍的最大吸收波長
2. 為了降低檢測成本因此重新尋找鉬酸銨及維他命C的工作範圍
3. 為了品質保證(檢量線仍能正常運作)找到最佳鉬酸銨及維他命C的工作濃度來降低鉬藍的干擾且確保磷鉬藍訊號夠大並繪製磷鉬藍法的檢量線
4. 檢測日常生活中的洗髮精磷濃度含量

假設：

假設一：假設本研究之磷鉬藍方法的最大吸收波長與文獻[參考資料1]相同為860 nm

假設二：假設下降反應物的劑量能夠讓磷鉬藍法仍可以正常運作

假設三：假設本研究建立無銻之檢量線可以用「線性」數學函數來描述

假設四：假設本研究建立無銻之檢量線可以成功檢驗出自來水中的磷酸鹽含量

假設五：本研究方法可以直接用來測量洗髮精中的磷酸鹽

四、探究方法與驗證步驟

(一) 研究設備及器材

1. 微量吸管	2. 容量瓶	3. 分光光度計	4. 電子秤	5. 維他命C
6. 蒸餾水	7. 鉬酸鉅	8. 磺胺酸	9. 量筒	10. 離心機

(二) 實驗架構

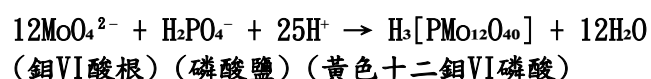


本研究基於磷鉬藍法進行水中磷酸鹽 (PO_4^{3-}) 的定量分析，透過酸性環境下磷酸鹽與鉬酸鉅 ($(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$) 的反應，生成磷鉬酸 ($\text{H}_3[\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}]$)，並在還原劑作用下轉化為磷鉬藍化合物，該產物的顏色變化可用於比色分析。為提高測定的靈敏度與準確性，本研究利用分光光度法，測量磷鉬藍產物在600~1000 nm 波長範圍的吸光度，建立磷酸鹽濃度與吸光度的線性關係，以提供更穩定的檢量線。本研究透過九宮格實驗設計，調整還原劑（維生素 C）與鉬酸鉅濃度 ($10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ M}$)，篩選出顏色變化最顯著的條件，以優化測定方法，並應用於環境水體的監測。本方法期望能在降低試劑使用量的同時，提升低濃度磷酸鹽檢測的靈敏度，為水質污染監測提供更具成本效益與環保性的分析技術。

(三) 實驗原理

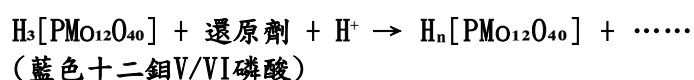
1. 磷鉬酸的形成與聚合機制

當磷酸根 (PO_4^{3-}) 進入酸性環境時，它可作為模板誘導鉬氧簇的自組裝，形成一種特殊的含磷 Keggin 結構的聚鉬多酸 ($\text{H}_3[\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}]$)，即磷鉬酸。此反應如下：

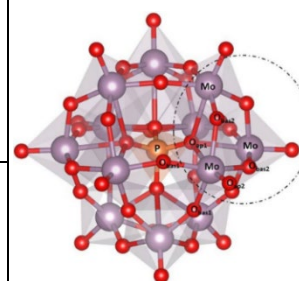


2. 磷鉬藍的形成與還原機制

磷鉬酸可在還原劑（如維生素 C）作用下，部分 Mo(VI) 被還原為 Mo(V)，形成具有深藍色的磷鉬藍 (Phosphomolybdenum Blue, PMB)：



此還原過程會導致 Keggin 結構內部的 Mo(VI) 與 Mo(V) 間的電子轉移，使整體結構吸收光譜產生變化，呈現典型的藍色。



(四) 實驗步驟

實驗一、配製不同濃度的鉬酸、維他命C

步驟1-1 秤取指定克數的鉬酸鉅、磺胺酸、維他命C

步驟1-2 分別加入至定量瓶中

步驟1-3 加蒸餾水至100 mL



實驗二、利用九宮格法配製自來水/蒸餾水中的磷鉬藍/鉬藍

步驟2-1 使用微量吸管將配製好的鉬依照不同濃度加入至瓶子，每瓶子各1000 μ L

步驟2-2 使用微量吸管將配製好的維他命C依照不同濃度加入至瓶子，每瓶子各1000 μ L

步驟2-3 使用微量吸管將自來水/蒸餾水加入至個瓶子，每瓶1000 μ L

步驟2-4 計時20分鐘等待反應並將反應後的結果利用分光光度計檢測吸收波長



實驗三、磷酸根檢量線的製作

步驟4-1 將自來水和蒸餾水顏色差異最大者最為檢量線樣本

步驟4-2 配置不同濃度的磷

步驟4-3 等待20分鐘反應後利用分光光度計檢測檢量線在810 nm的吸收度



實驗四、將檢量線應用於監控新竹各區一週的自來水總磷濃度變化

步驟5-1 收集竹北、香山、新竹、芎林等地每日自來水樣本，持續五天

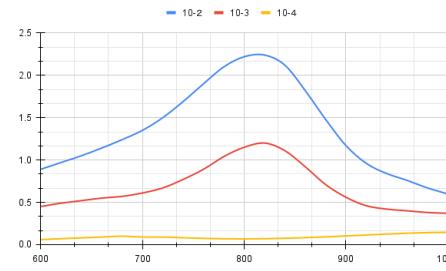
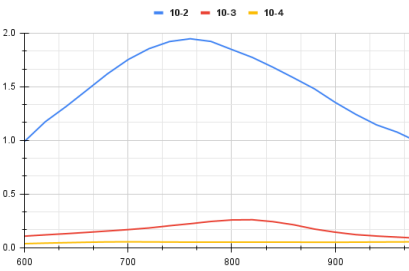
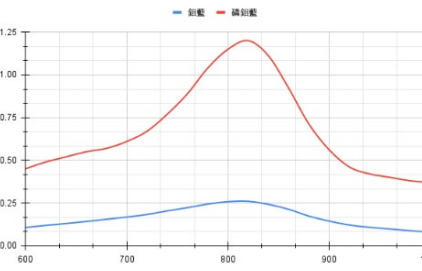
步驟5-2 將收集到的自來水樣本分別加入檢量線測試濃度劑量

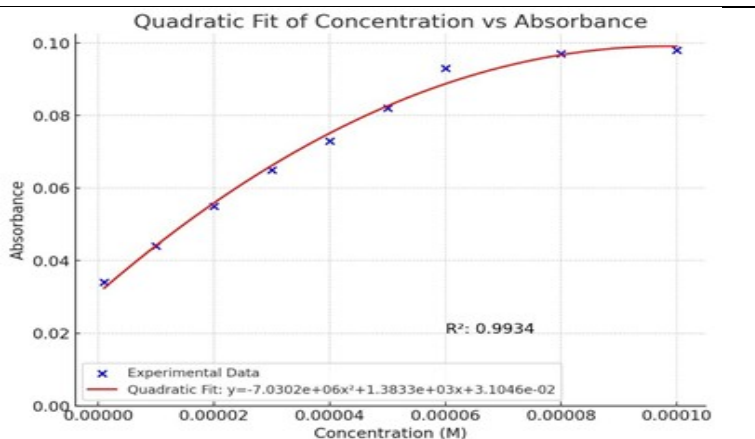
步驟5-3 計時20分鐘等待反應時間並使用分光光度計檢測反應後的實驗樣本

步驟5-4 依照數據帶入檢量線並回推磷酸根的濃度

(五)實驗結果

1.

		
【圖】固定鉬酸濃度 10^{-2} M 探討維他命 C 濃度改變($10^{-2} \sim 10^{-4}$ M)對檢測自來水(含有磷)的影響 (藍色線：10^{-2}；紅色線：10^{-3}；黃色線：10^{-4})	【圖】固定鉬酸濃度 10^{-2} M 探討維他命 C 濃度改變($10^{-2} \sim 10^{-4}$ M)對檢測蒸餾水(不含磷)的影響 (藍色線：10^{-2}；紅色線：10^{-3}；黃色線：10^{-4})	【圖】在鉬酸 10^{-2} M、維他命 C 10^{-3} M 條件下，磷鉬藍（紅線）於約 820 nm 顯現明顯吸收峰，吸光值明顯高於鉬藍（藍線），顯示本方法具良好靈敏度與辨識能力。
解說： 本研究發現，鉬酸濃度對鉬藍與磷鉬藍的生成具有顯著影響。高濃度鉬酸（10^{-2} M）可促進還原反應，提高藍色產物有助於提升定量分析的準確性。相較之下，磷鉬藍在低濃度條件下仍能維持較高的吸收強度，顯示其對鉬酸濃度的最終選擇 810 nm 為測量波長 進行吸光值判讀。		

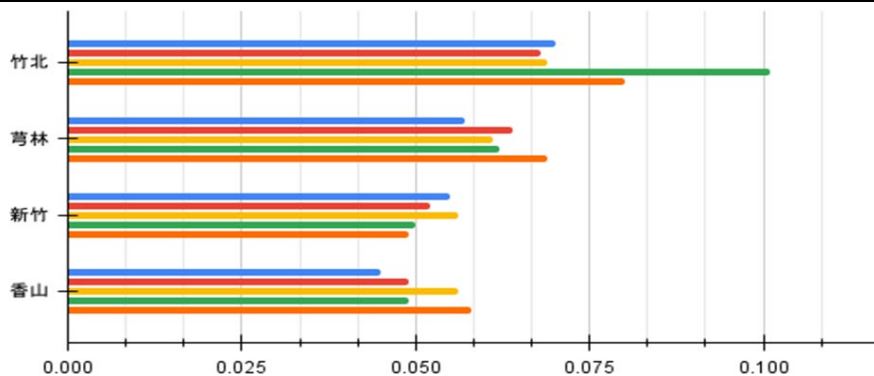
2. 解說： 此函數代表的是吸光值與濃度之間的非線性關係。R^2 值為 0.9934，表示此模型對數據的擬合程度極高，解釋了 99.34% 的變異。這種非線性現象可能與以下因素有關：在高濃度下，吸光度不再與濃度成正比（偏離比耳定律），可能是因為溶液顏色過深導致光線散射或穿透不足。發生了分子間相互作用（如聚集），導致有效吸收光的能力降低。儀器靈敏度在某範圍內飽和，無法準確偵測更高吸光值。因此，在未達飽和區的濃度範圍內，吸光度仍可作為定量濃度的依據；但在高濃度時應避免直接以吸光度推算濃度，建議稀釋樣品或選擇更適合的波長量測。	 【圖】圖中呈現的是溶液濃度（x 軸）與吸光值（y 軸）之間的關係，藍色叉叉為實驗測得的數據點，紅色曲線則為透過二次函數所擬合的減量線
---	---

3. 將本研究應用於新竹地區自來水總磷濃度監測

解說：

這張圖顯示的是3/17-3/21一週內新竹地區各區（香山、新竹、芎林、竹北）自來水中的總磷濃度變化。

不同顏色的橫條應該代表不同日期或不同的時間點測量的值。以下是針對各區的初步分析：



【圖】今年新竹各地一周自來水含磷檢測。橫軸是總磷濃度（單位是 mg/L），縱軸是地區名稱。（藍色為3/17依序為3/18.19.20，橘色為3/21）

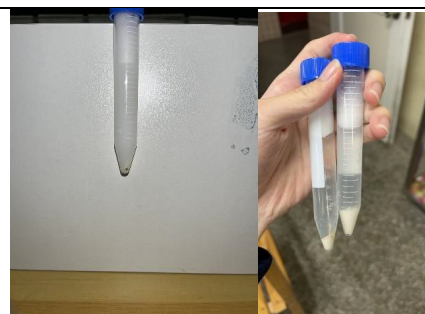
4. 洗髮精磷酸鹽適用性分析

解說：

實驗中發現，在添加檢量線配置溶液後，樣品液體呈現明顯混濁，導致吸收光譜測量無法進行，推測此混濁現象可能源自洗髮精配方中界面活性劑遇鹽析作用後產生膠體顆粒凝聚，進而散射光線並影響光譜讀值。

洗髮精中常見成分如十二烷基硫酸鈉與聚氧乙烯硫酸酯等，皆為含有長碳鏈的陰離子界面活性劑。在水溶液中，此類物質通常以膠束形式穩定存在，但當加入高濃度鹽類（如飽和 NaCl）時，會導致膠束間排斥力降低、聚集能力增強，進而發生鹽析現象。此過程可能導致界面活性劑脫穩定化、形成不均勻膠狀懸浮物，進一步與磷鉬藍反應系統產生物理干擾。

此外，鹽析過程中形成之非均質乳狀膠體顆粒可能包覆檢測溶質或造成反應物質分佈不均，進一步影響磷鉬藍的反應進行與光譜穩定性。此混濁狀態使得樣品吸光度讀值不準確，進而無法套用原有之檢量線模型進行濃度估算。



【圖】洗髮精經過沉澱處理

我們嘗試應用改良後的磷鉬藍法進行洗髮精樣品中磷含量之定量偵測，並採用飽和食鹽水進行樣品前處理與離心，以剔除乳化劑、香料與高分子聚合物等潛在干擾。

（六）實驗討論

假設一：假設本研究之磷鉬藍方法的最大吸收波長與文獻相同為860 nm

假設不成立。本研究測得之吸收光譜最大吸收波長為800~820 nm

假設二：假設下降反應物的劑量能夠讓磷鉬藍法仍可以正常運作

假設成立。本研究成功改良傳統磷鉬藍法，透過系統性調整鉬酸與維他命 C 濃度

假設三：假設本研究建立之檢量線可以用「線性」數學函數來描述

假設成立。成功建立磷酸鹽檢量線，在低濃度範圍內具良好定量能力(<0.00006)，但是在高濃度時其擬合曲線為二次函數，具有高 R^2 值（0.9934），代表模型在高濃度也可以使用。

假設四：假設本研究建立無銻之檢量線可以成功檢驗出自來水中的磷酸鹽含量

假設成立。應用結果顯示，新竹地區四地自來水樣中皆含有可量測之磷濃度，濃度介於 0.045~0.101 ppm，顯示本研究方法雖然非常簡約，但仍具應用於常見水樣監測之潛力。

■ 竹北

■ 芎林

■ 新竹

■ 香山

● 在3/20或3/21出現異常高值（約 0.10 mg/L）。 ● 其餘幾天也相對偏高（大約 0.06 - 0.07 mg/L）。 ● 有可能是短期污染事件或排放異常，建議進一步追查原因。	● 變化範圍介於約 0.05 - 0.07 mg/L。 ● 雖然沒有像竹北那樣的異常高點，但3/19~3/21數值偏高。	● 整體穩定在約 0.045 - 0.055 mg/L 之間。 ● 各天的變化幅度不大，是變異最小的一區。	● 和新竹類似，總磷濃度保持穩定，大致在 0.045 - 0.055 mg/L。 ● 表現平穩，沒有異常波動。
---	---	--	--

假設五：本研究方法可以用來測量洗髮精中的磷酸鹽

假設不成立。嘗試應用於洗髮精品質分析時，因界面活性劑在飽和鹽水中產生膠體顆粒導致樣品混濁，影響光譜穩定性與結果判讀，顯示該方法應搭配適當前處理技術以去除干擾。

五、結論與生活應用

本研究成功建立一套不依賴銻元素、具備高靈敏度與穩定性的磷酸鹽定量分析法，成功改良傳統磷鉬藍法並建立磷酸鹽檢量線，不僅有效降低化學試劑用量與成本，亦減少重金屬污染風險，符合綠色化學原則。此方法靈敏度高、操作簡便，具備以下優勢：

1. 減少重金屬污染風險，符合綠色化學原則；
2. 降低化學試劑用量與成本，利於推廣；
3. 提升對 ppm 級磷酸鹽的靈敏度與檢測穩定性；
4. 可作為教育實驗、自來水水質監測及初階環境分析之工具；
5. 具備進一步應用於複雜樣品（如洗髮精）之潛力，搭配前處理技術可望擴展使用範圍。



實地應用結果顯示，新竹地區四地自來水樣中皆含有可量測之磷濃度，濃度介於 0.045~0.101 ppm，顯示本方法雖然簡約，卻具備應用於常見水樣監測的潛力。其中竹北地區在 3/17 - 3/21 週內總磷濃度異常偏高，可能有局部污染源，應特別留意；而新竹與香山地區水質則最為穩定，總磷濃度維持在低值。此外，應用於洗髮精磷酸鹽分析時亦展現出初步可行性，未來可嘗試加入濾膜過濾或改變萃取方式，以提升測量穩定性與準確度，進一步拓展其在複雜樣品中的應用潛力。

生活應用：

綜合而言，本研究提出之改良方法不僅降低試劑用量、提升反應靈敏度與穩定性，亦驗證其於實際樣品（自來水與清潔用品）中具備初步應用潛力，未來可作為水質監測與教學實驗之有效工具，亦可進一步結合萃取技術擴展至更複雜樣品之環境分析

六、參考資料

1. 「鉬藍」發現，全國高級中等學校專業群科 109 年專題及創意製作競賽「專題組」作品說明書 <https://vtedu.k12ea.gov.tw/uploads/1608710292081UIFviNcG.pdf>
2. 王嶽斌 (1995)。富磷活性污泥釋磷及再攝取特性之研究。國立中央大學環境工程研究所碩士論文。
本研究探討了在不同操作條件下，富磷活性污泥的釋磷及再攝取特性，並可能應用了磷鉬藍法來測定水中磷的濃度。

3. 李昱 (2003)。鉬藍法測定土壤萃取液中磷之干擾因素探討。國立台灣大學農業化學研究所碩士論文。
4. 陳建國, 李靜, 吳玉環. (2011). 水中總磷的鉬藍分光光度法測定與應用研究. 環境科學與管理, 36(10), 123 - 126.
5. 王紅, 李紅軍. (2007). 總磷測定方法比較分析. 工業用水與廢水, 38(2), 61 - 63.